

汾河中下游河道生态需水量研究

邢肖鹏, 侯建华, 冯民权, 吴存

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 汾河中下游流域地处我国黄土高原干旱、半干旱地区, 水资源短缺与生态环境矛盾十分突出, 从水资源开发利用中的生态环境问题出发, 构建了适合汾河中下游生态需水量计算模型。河流生态需水量是一个随着时段、河段的不同而发生变化的动态值, 把汾河中下游以水文站分成 5 段, 分别计算了不同水文频率年各河段生态需水量, 把河道生态需水量分为河道蒸发、渗漏、自净、输沙需水量和基础流量, 并根据它们之间的相互关系, 界定了总生态需水量。结果表明, 汾河中下游 20%, 50%, 70% 和 95% 水文频率年河道生态需水量分别为 $6.17 \times 10^8 \text{ m}^3$, $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.37 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.59 \times 10^8 \text{ m}^3$; 占流域代表年径流量的百分比分别为 55.43%, 61.97%, 61.27%, 88.15%, 且占多年平均流量的百分比分别为 73.68%, 45.10%, 28.27%, 18.92%。要实现汾河流域的可持续管理, 必需采取切实有效的措施进行水资源开发调控, 分时段分河段地进行水资源的合理利用。

关键词: 河道生态需水量; 水资源; 汾河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0199-04

中图分类号: X522

Ecological Water Demands by Channels in Middle and Lower Reaches of Fenhe River

XING Xiaopeng, HOU Jianhua, FENG Minquan, WU Cun

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of the Education Ministry, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The middle and lower reaches of Fenhe River is in the arid and semiarid area of the Loess Plateau of China and shortage of water resources and eco-environmental issues are very prominent. In views of the eco-environmental problems in development and utilization of water resources, this paper aims to construct a calculation model of ecological water demands in the middle and lower reaches of Fenhe River. Because the demands change with time and river sections, the middle and lower reaches of Fenhe River are divided into five sections according to hydrological stations for the calculation of ecological water demands with different hydrological frequencies. Ecological water demands are classified as river ecology surface evaporation, seepage demand, self-purification demand, sediment transport demand, and base flow demand. According to the relationship among them, total eco-environmental water demand is defined. Annual ecological water demands with the 4 hydrologic frequencies of 25%, 50%, 70%, and 95% are 617.43, 377.94, 236.93, and 158.56 million m^3 ; the percentages over annual ecological water demand by channels are about 55.43%, 61.97%, 61.27%, and 88.15%; and the percentages over total flow averaged over years are 73.68%, 45.10%, 28.27%, and 18.92%, respectively. It is necessary to take effective measures to control water resources for the sustainable management of Fenhe River basin and make use of water resources in different periods and reaches.

Keywords: ecological water demand by channel; water resource; Fenhe River

国外 20 世纪 90 年代以前对生态需水量的研究主要侧重于河道生态系统。最初是根据水文历史资料进行河流流量分析, 主要有 Tennant 法和 7Q₁₀ 法,

后来水力学家根据河道断面参数判断河流所需流量, 主要有 R₂CROSS 法和湿周法, 但这两种河道生态需水研究方法缺乏生态学依据, 于是 Petts^[1] 提出了根

收稿日期: 2010-03-21

修回日期: 2010-05-29

资助项目: 山西省河道管护服务总站科技计划基金“汾河整治(河流生态修复)规划”(106-230859)

作者简介: 邢肖鹏(1960—), 男(汉族), 河北省深泽县人, 教授级高级工程师, 博士研究生, 主要从事水环境模拟与污染控制研究。E-mail: 245522182@qq.com。

通信作者: 侯建华(1984—), 男(汉族), 安徽省肥西县人, 硕士研究生, 从事水环境模拟与污染控制研究。E-mail: houjianhualove@126.com。

据河道物理形态和所关心的水生生物对流量的需求,来确定最小及最佳流量; Bovee^[2] 将水力分析与生境评价相结合,提出了基于生境适宜性评价和模拟的方法,如 IFIM 法。20 世纪 90 年代之后,随着河流连续统一等思想的提出, Petts^[3] 等人,还考虑了河流流量在纵向上的连接以及河流生态系统的完整性,并充分认识到了洪泛平原流量在保护河流生态系统中的重要性。最为突出的方法有 BBM 法^[4] 和整体法^[5]。赫得韦特等^[6] 认为,由于河流生态系统对水的需求,要求管理者重新认识水资源的配置。我国对生态需水量的研究主要有汤奇成^[7] 提出了生态用水概念,刘昌明^[8] 提出了“生态水利”,指出环境用水需遵循的 4 大平衡原则,从整体上和方向上指明了河道内、外生态需水研究的范畴和框架。李丽娟等^[9] 指出生态需水量是为维持地表水体特定的生态环境功能,天然水体必须储存和消耗的最小水量;也有人认为河流生态需水是指为维持地表水体特定功能所需要的一定水质标准下的水量,具有时间和空间上的变化^[10]。方法主要有最小月平均流量法,月(年)保证率设定法。另外,针对我国北方河流特点,李丽娟和郑红星^[9] 提出了河流输沙需水量,刘凌^[12] 提出了防止河流蒸发、渗漏生态需水量都是河流生态需水量的一部分的研究结论。

目前,由于生态环境需水量的理论和计算方法尚不成熟^[9,11],首先,某条河流生态需水量不是一个定值,它是一个随着季节、时段、河段的不同而发生变化的动态值;其次,每条河流都有它独特的生态系统特性,不可能用某一固定的方法来确定各条河流的生态需水量;再次,上下游之间河道生态需水量的重复计算问题等,给生态环境需水在实际中的配置带来了一定的难度,同时也阻碍了生态需水在水资源管理中的应用。

因此,将以汾河中下游为例,提出河道需水量在不同频率年分段计算的方法和思路,依据汾河渗漏性强,含沙量大等特性来确定生态需水的类型,同时考虑河道不同功能生态需水的交叉重叠部分及其上、下游区间的重复计算问题,提出适合汾河河道生态需水量计算的方法,从而为汾河流域水资源规划与合理配置提供依据。

1 汾河河道主要生态需水类型确定

汾河河道主要环境问题有河道断流,河道渗漏,泥沙淤积,水质污染和地下水超采等。20 世纪 90 年代以来汾河中游连续出现多年多日断流现象,兰村水文站 2001 年以来断流天数在 250 d 以上,即使不断

流,在枯水期流量也极小;河道渗漏严重,当流量以 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 通过义堂至霍州什林之间河道时,测得其渗漏量为 $0.998 \text{ m}^3/\text{s}$; 由于汾河流域处于黄土高原,水流挟带泥沙特别严重,其多年平均输沙量 $1.11 \times 10^7 \text{ t}$,使得大量泥沙淤积在河道内;汾河每年接纳的污废水量达 $3.35 \times 10^8 \text{ t}$,其中严重污染劣(V)类水占河长 71.8%。使接近 90% 的水功能区达不到规定水质目标的要求。由于水资源短缺,1994—2002 年多年平均汾河地表水资源开发利用率为 86.3%,城镇和工业与农业争水,最终挤占生态水量^[14]。因此,汾河河道主要生态需水类型为河道主流需水量(河道基础流量、自净需水量以及汛期输沙需水),河道渗漏需水量和河道蒸发需水量。

2 河道生态需水量模型的建立

对于必须同时满足几种功能的河段的河道需水量,可按照最大原则进行确定^[12],即选取各月不同功能河道需水量中的最大值作为该月的河道主流需水量(公式 1),对河道主流、蒸发、渗漏各月需水量进行加和求得月河道生态需水量(公式 2),再对各月的河道需水量进行加和求得年河道生态需水量。

$$W_{Mi} = \max\{W_{Bi}, W_{Ci}, W_{Tsi}\} \quad (1)$$

$$W_{Ri} = W_{Ei} + W_{Si} + W_{Mi} \quad (2)$$

式中: W_{Mi} ——第 i 月的主流需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Bi} ——第 i 月的基础流量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Ci} ——第 i 月的自净需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Tsi} ——第 i 月的输沙需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Ri} ——第 i 月的河道生态需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Ei} ——第 i 月的蒸发需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$); W_{Si} ——第 i 月的渗漏需水量 ($\text{m}^3/\text{月}$)。

对于整个河流的河道需水量而言,为了避免上、下游区间生态需水量的交叉重叠部分的重复计算的问题,主流需水量应取各个河段中的最大值,加上整个河道的蒸发、渗漏需水量即可。

2.1 河道蒸发需水量

根据水面积、降水量、水面蒸发量,可以求得相应各月的蒸发生态需水量,其计算公式为^[13]:

$$\begin{cases} W_E = A(E - P) & (E > P) \\ W_E = 0 & (E < P) \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_E ——蒸发生态需水量 (m^3); A ——各月平均水面面积 (m^2); E ——各月平均蒸发量 (mm) 由 E601 水面蒸发器测定结果计算而得; P ——各月平均降水量 (mm)。

2.2 河道渗漏需水量

当河水位高于地下水位时,土质类别和过水状态关系的河道渗漏补给量公式为^[14]:

$$W_s = W_J \times \delta \times L \quad (4)$$

$$\delta = \frac{K}{W_{dj}^m} \quad (5)$$

式中: W_s —— 河道的渗漏量 (m^3/s); W_J —— 河道的流量 (m^3/s); L —— 河道的长度 (km); δ —— 河道单位长度水量损失率 ($\%/km$); W_{dj} —— 河道的流量 (m^3/s); K —— 土壤透水性系数; m —— 土壤透水性指数。

2.3 河道的主流需水量

考虑到汾河中下游生态环境的要求, 主流需水量包括: 基础流量 (W_B), 自净需水量 (W_C) 和输沙需水量 (W_{TS})。 (1) 河道基础径流量 W_B 。河道基础径流量即保证河道不断流, 维护河流水生态环境基本健康所需的最小水量。本研究采用典型的 Tennant 法 (即 Montana 法) 来计算, 由于河流基础径流量可以用于整个河道, 所以以汾河下游柴庄水文站天然径流量的 10% (极限最低流量) 作为维护水生态环境的最小生态需水量需要的用水量。 (2) 河道自净需水量 W_C 。河流自净需水量是河流水体对排放入河的污染物进行净化和改善水质, 河道中需要保持的最小水量。如果采用我国常用的近 10 a 最小月平均流量法来计算, 可以发现与计算河流基础径流量的方法基本一致。因此, 在计算河流的主流需水量时, 河流自净需水量可以不予计算。 (3) 河道输沙需水量 W_{TS} 。

一般河流, 汛期的输沙量约占全年输沙总量的 80% 以上, 即河流的输沙功能主要在汛期完成。因此, 充分利用汛期洪水较强的输沙能力, 以维持河流形态的动态平衡, 是有效而且可行的手段。河流汛期输沙需水量计算公式为^[9]:

$$W_{TSij} = S_j / C_{max} \quad (6)$$

式中: W_{TSij} —— 第 i 年第 j 月输沙水量; S_j —— 第 i 年第 j 月的输沙量; C_{max} —— 多年最大月平均含沙量的平均值。

3 河道生态需水量模型的应用及其结果分析

3.1 河道生态需水量的模型的应用

利用汾河中下游 6 个水文站 (分别为兰村、二坝、义堂、赵城、柴庄、河津) 1965—2000 年共 36 a 的实测径流量资料进行了排频, $P = 20\%$ 为丰水年 (1978 年), $P = 50\%$ 为平水年 (1982 年), $P = 75\%$ 为枯水年 (1991 年), $P = 95\%$ 为特枯水年 (1999 年)。根据汾河河道各段不同的特点分别计算 4 个水文频率年的生态需水量。

根据公式 (1—6) 求出 6 个水文站之间总蒸发需水量、渗漏需水量如表 1—2 所示; 分别计算各个水文站输沙需水量, 取其中输沙需水量的最大值 (表 3); 汾河中下游生态需水量如表 4 所示。

表 1 不同水文频率年蒸发需水量

$10^4 m^3$

频率年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计
$P = 20\%$	31.3	59.9	99.2	158.5	14.1	181.2	261.2	13.1	0.0	6.6	96.0	40.8	962.0
$P = 50\%$	33.7	28.5	71.9	79.8	97.8	119.6	55.8	2.6	44.9	83.9	23.2	32.8	674.5
$P = 75\%$	25.8	32.8	11.3	82.2	70.8	262.7	123.2	70.3	31.7	55.0	34.5	10.2	809.4
$P = 95\%$	29.8	46.6	68.5	46.4	73.4	54.3	39.9	130.2	9.2	14.0	30.5	18.0	560.7

表 2 不同水文频率年渗漏需水量

$10^4 m^3$

频率年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计
$P = 20\%$	1 820	2 058	2 997	1 713	1 713	2 011	4 941	3 412	10 147	4 069	3 019	1 500	39 497
$P = 50\%$	1 101	974	2 619	1 192	501	965	1 433	6 521	4 068	2 227	1 073	931	23 605
$P = 75\%$	971	866	1 725	1 912	1 523	3 852	1 456	495	889	2 103	808	663	17 262
$P = 95\%$	720	819	2 130	1 009	469	651	1 375	2 530	1 166	942	1 055	540	13 406

表 3 不同水文频率年输沙需水量

频率年	汛期输沙量 / $10^8 kg$					河流输沙需水量 / $10^4 m^3$					总计
	5月	6月	7月	8月	9月	5月	6月	7月	8月	9月	
$P = 20\%$	0.67	2.65	42.60	18.21	79.54	80.65	319.01	5 128.21	2 192.13	9 575.06	17 295.05
$P = 50\%$	0.61	1.54	2.57	50.23	38.21	73.43	185.39	309.38	6 046.71	4 599.74	11 214.64
$P = 75\%$	5.01	19.32	5.64	0.14	0.99	603.11	2325.75	678.95	16.85	119.18	3 743.83
$P = 95\%$	0.16	0.53	1.75	2.74	1.408	19.26	63.80	210.67	329.84	169.50	793.07

表 4 不同水文频率年生态需水量

10⁴ m³

频率年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计
P= 20%	2 340	2 882	3 558	2 023	1 808	2 511	10 330	5 617	19 722	5 134	3 879	1 937	61 743
P= 50%	1 505	1 326	2 996	1 407	672	1 270	1 798	12 570	8 713	2 765	1 480	1 292	37 794
P= 75%	1 265	1 130	1 930	2 283	2 197	6 440	2 258	623	1 064	2 702	1 002	799	23 693
P= 95%	934	1 025	2 272	1 180	595	791	1 626	2 990	1 363	1 168	1 280	632	15 856

3.2 生态需水量结果分析

从表 4—5 可看出: (1) 丰水年生态需水量比枯水年大, 原因是丰水年水面蒸发需水量、河流渗漏需水量、输沙需水量均比枯水年大。(2) 20% 与 50% 频率年生态需水量 7—9 月较大, 75% 与 95% 频率年生态需水量在年内分布比较均匀。(3) 20%, 50%, 70% 和 95% 水文频率年汾河中下游河道生态需水量分别为

6.17×10⁸ m³, 3.78×10⁸ m³, 2.37×10⁸ m³, 1.59×10⁸ m³; 总体上渗漏、输沙、蒸发需水量和基础径流量分别占生态需水量的 70.96%, 19.62%, 15.47% 和 2.57%。

不同频率年河流生态需水量的差异极大且组成比例不同, 若以某个固定值作为河道生态需水量不符合河流的实际状况。因此河流生态需水量应该是随着季节、时段、年际的不同而确定相应值。

表 5 不同生态需水类型的水量占生态需水量的比例

频率年	不同生态需水类型的水量/10 ⁸ m ³				占生态需水量的比例/ %			
	蒸发需水量	渗漏需水量	输沙需水量	基础径流量	蒸发需水量	渗漏需水量	输沙需水量	基础径流量
P= 20%	0.096 2	3.949 7	1.729 5	1.115 7	1.558 1	63.970 0	28.011 3	18.070 1
P= 50%	0.067 5	2.360 5	1.121 5	0.609 9	1.786 0	62.457 0	29.674 0	16.137 5
P= 75%	0.080 9	1.726 2	0.374 4	0.386 7	3.414 5	72.857 0	15.802 1	16.321 3
P= 95%	0.056 1	1.340 6	0.079 3	0.179 9	3.538 1	84.548 4	5.001 3	11.345 9

从表 6 可看出, 20%, 50%, 70% 和 95% 水文频率年汾河中下游河道生态需水量占代表年径流量的百分比分别是 55.43%, 61.97%, 61.27%, 88.15%; 占多年平均流量的百分比分别是 73.68%, 45.10%, 28.27%, 18.92%。因此汾河中下游流域在地表水资源的利用率分别应该是 44.57%, 38.03%, 38.73%, 11.85%; 也说明以多年平均流量百分比中某一个定值作为河流生态需水量不符合河流的实际状况。

表 6 生态需水量占代表年径流量、多年平均径流量的比例

频率年	代表年径流量/10 ⁸ m ³	生态需水占代表年径流量比例/ %	生态需水占多年平均流量比例/ %
P= 20%	11.156 9	55.43	73.68
P= 50%	6.098 8	61.97	45.10
P= 75%	3.867 1	61.27	28.27
P= 95%	1.798 7	88.15	18.92

4 结论

(1) 提出了河道需水量在不同频率年分月计算的方法和思路, 揭示了河道需水量在流域内不同年份不同月份的分配规律, 例如: 20% 频率年的 9 月生态需水量达 1.97×10⁸ m³, 而 95% 频率年的 5 月生态需水量只有 0.06×10⁸ m³, 相差达 33 倍。

(2) 汾河流域河道系统生态需水量可以分为渗漏、蒸发需水量和主流需水量, 其中主流需水量是取输沙需水量和基础径流量的较大值, 且只需取 5 个河段的最大值作为整个河流的主流需水量, 这样既解决河道需水类型的重复计算问题, 又避免了中下游重复计算问题。这些生态需水类型都具有明显的季节变化特征, 例如, 20%, 50%, 75% 频率年的输沙需水量大于主流需水量, 而 95% 频率年相反。总体上渗漏、蒸发需水量和主流需水量分别占生态需水量的 70.96%, 2.57% 和 26.43%。

(3) 20%, 50%, 70% 和 95% 水文频率年的汾河中下游河道生态需水总量分别为 6.17×10⁸ m³, 3.78×10⁸ m³, 2.37×10⁸ m³, 1.59×10⁸ m³, 占代表年径流量的百分比分别是 55.43%, 61.97%, 61.27% 和 88.15%, 也说明地表水资源的利用率分别应该是 44.57%, 38.03%, 38.73%, 11.85%。国际上公认的地表水合理开发程度是 30%, 极限开发利用程度是 40%, 然而在汾河流域, 1994—2002 年多年平均地表水的综合开发程度高达 86.3%, 远远超过河道水体的提供能力, 即在汾河流域已经开采了大量的河流系统的生态需水。为实现汾河流域的持续管理, 必需采取切实有效的措施进行水资源开发的调控, 分时段分河段地进行水资源的合理利用。

(下转第 207 页)

表5 土壤污染物浓度最大时不同土地利用方式的风险评估

项目	非致癌参考 剂量 $R_{FD}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	儿童居住 极端情况	成人居住 极端情况	成人商服 与工业	致癌斜率 因子 $S_F/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	儿童居住 极端情况	成人居住 极端情况	成人商服 与工业
经口暴露苯摄	4.00E-03	2.56E-05	3.43E-06	2.45E-06	5.50E-02	4.69E-10	2.52E-10	1.87E-10
呼吸暴露苯摄	8.57E-03	3.39E-10	1.82E-10	1.30E-10	2.73E-02	6.61E-15	1.42E-14	1.06E-14
皮肤接触苯摄	3.88E-03	2.37E-05	1.77E-05	2.53E-06	5.67E-02	4.35E-10	1.30E-09	1.93E-10
苯风险合计		4.93E-05	2.11E-05	4.98E-06		9.04E-10	1.55E-09	3.80E-10
硝基苯经口暴露	2.00E-03	2.60E-02	3.49E-03	2.49E-03				
苯胺经口暴露					5.70E-03	1.19E-06	6.38E-07	4.74E-07
风险总计		2.61E-02	3.51E-03	2.50E-03		1.19E-06	6.39E-07	4.75E-07

3 结论

(1) 利用健康风险评价,对被有机物污染过的场地经土壤修复前后的风险做了评估。通过土壤修复工程,硝基苯非致癌风险由治理前的 4.39~45.84 降低到了 $2.49 \times 10^{-3} \sim 2.60 \times 10^{-2}$,苯胺的致癌风险由治理前的 $1.12 \times 10^{-6} \sim 2.8 \times 10^{-6}$ 降低到了 $4.74 \times 10^{-7} \sim 1.19 \times 10^{-6}$,达到了工程目标;并根据不同土地利用方式的风险值,依据风险最小原则,提出场地的适宜用途为商服用地或工业用地。

(2) 通过实际应用的效果可以说明,健康风险评价能够评估有机物污染土壤修复工程的有效性,健康风险评价也可与其它方法参照使用。

[参 考 文 献]

- [1] 晁雷,周启星,陈苏. 建立污染土壤修复标准的探讨[J]. 应用生态学报,2006,17(2): 331-114.
- [2] 姜林,王岩. 场地环境评价指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2004.

- [3] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol _I. Human Health Evaluation Manual [M]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response and US Environmental Protection Agency, 1989.
- [4] Arizona Department of Environmental Quality. Arizona soil remediation standards(R18-7-203) [EB/OL]. (2008-05-11) [2009-04-09]. <http://www.azdeq.gov/function/laws/rules.html>.
- [5] US EPA. Guidelines for Exposure Assessment [M]. Washington, DC: Risk Assessment Forum and U. S. Environmental Protection Agency, 1992.
- [6] US EPA. Exposure Factors Handbook [M]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1997.
- [7] Nitrobenzene (CASRN 98-95-3) [EB/OL]. (2008-11-20) [2009-04-09]. <http://www.epa.gov/NCEA/iris/subst/0079.htm>.
- [8] Aniline (CASRN 62-53-3) [EB/OL]. (2008-05-11) [2009-06-04]. <http://www.epa.gov/ncea/iris/subst/0350.htm>.
- [9] Benzene (CASRN 71-43-2) [EB/OL]. (2008-04-03) [2009-11-09]. <http://www.epa.gov/NCEA/iris/subst/0276.htm>.

(上接第202页)

[参 考 文 献]

- [1] Potts G E. 蓄水河流对环境的影响[M]. 王兆印,译. 北京: 中国环境科学出版社,1988.
- [2] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [M] // Washington: US Fish and Wildlife Service, Instream Flow Information Paper, 1982: 26.
- [3] Potts G E. Water allocation to protect river ecosystems [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1996,12: 353-365.
- [4] Raskin P D, Hansen E. Water and sustainable: Global patterns and long-range problems[J]. Natural Research Forum, 1996, 20 (1): 1-15.
- [5] Ward J V, Stanford J A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1995,11: 105-119.
- [6] 赫得韦特 F. 可持续水资源管理及其基本体系[J]. 水利

- 水电快报,1998,19(18): 18-22.
- [7] 汤奇成. 塔里木盆地水资源与绿洲建设[J]. 自然资源, 1989(6): 28-34.
- [8] 刘昌明. 我国西北大开发中有关水资源的若干问题[J]. 中国水利,2000(8): 23-25.
- [9] 李丽娟,郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报,2000,55(4): 495-500.
- [10] 严登华,何岩,邓伟. 东辽河流域系统生态需水研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1): 46-49.
- [11] 刘凌,董增川,崔广柏. 内陆河流生态环境需水量定量研究[J]. 湖泊科学,2002,14(1): 25-30.
- [12] 张远,杨志峰,王喜琴. 河道生态环境分区需水量的计算方法与实例分析[J]. 环境科学学报,2005,25(4): 7-13.
- [13] 丰华丽,王超,李勇. 流域生态需水量的研究[J]. 环境科学动态,2001(1): 27-30.
- [14] 山西省水利厅总工办. 汾河清水复流工程水量调度方案[R]. 太原: 山西省水利厅,2008: 100-101.